

論文 10万 Bq/kg 超の放射性 Cs に汚染した焼却飛灰の最終処分場建設の基本的考え方

山田 一夫*1・大迫 政浩*2

要旨: 福島第一原子力発電所事故由来の放射性 Cs により汚染された可燃性廃棄物の焼却飛灰には、3割程度の塩類 (CaCl₂, NaCl, KCl) に加え、放射性 Cs も安定性 Cs と共に多くが可溶性塩として含まれる。特に 10 万 Bq/kg 超に汚染した焼却飛灰の最終処分場を鉄筋コンクリートで建設する際に必要な、処分対象物の特性を考慮した多重防御の基本的考え方をまとめる。建設候補地選定や構造設計時においてもコンクリートの耐久性を考慮すべきで、過酷事故時を含めたマネジメント、耐用年数、地震時の要求性能、ひび割れ (温度応力と乾燥)、飽和塩水による ASR と塩害と塩類劣化の促進を考慮する最新技術による総合的対策を行う。

キーワード: 汚染飛灰, 最終処分, 多重防護, 可溶性塩類, Cs, 耐久性, 過酷事故

1. はじめに

福島県第一原子力発電所事故に由来する放射性 Cs 放出により、東日本の広域が放射能汚染した。土壤中の放射性 Cs は粘土鉱物などに吸着され安定化しており、粘土自体の移動以外に、イオンとしての移動は限定的である。一方、草木など可燃物に含有され、焼却・減容化がなされる場合、特に一般廃棄物の焼却飛灰では放射性 Cs が可溶性となっている。このため放射能汚染した焼却飛灰 (以降、汚染飛灰と呼ぶ) の最終処分には、水による漏洩を防ぐため遮水が重要となる。鉄筋コンクリート構造物による、10 万 Bq/kg を超える指定廃棄物の汚染飛灰の最終処分を考えた場合、注意すべき点がある。

- ・飛灰の特性 (潮解性と高濃度塩類)
- ・機能を担保する期間 (例えば 100 年)
- ・機能の確実性の担保 (機能不全の検出と回復手法)
- ・経済的合理性とリスクのバランス

これらをすべて満たすためには、既存の手法だけではなく、最新のコンクリート工学の考え方や耐久性予測の手法が求められる。

放射性廃棄物処分という観点では、放射能レベルが今回考慮する 8kBq/kg を超える指定廃棄物¹⁾に相当する L2 と称される低レベル廃棄物の鉄筋コンクリート製の最終処分場が六ヶ所村に建設されすでに操業している。しかし、汚染飛灰という観点で考えると放射性廃棄物の世界でも最終処分の方法はいまだに確立していない。

本稿では、汚染飛灰という特殊な廃棄物が鉄筋コンクリートにもたらす影響と発生しえる過酷事故を考慮し、遮断型相当の最終処分場において処分するための技術的考え方を提示し、この考え方に沿い多様な観点から鉄筋コンクリート製構造物材料の設計について論じる。

2. 汚染飛灰の最終処分場が有すべき機能

汚染飛灰の最終処分場の基本的機能として、放射線の遮蔽、放射性 Cs と有害物質の環境からの遮断、安全性の確認の三つがある。

一例として環境省が示した構造例を図-1¹⁾に示す。遮蔽はコンクリートピット上部の鉄筋コンクリート製の覆い (蓋) と土壌層などで十分な効果が得られる。遮断は、上部土壌層、ベントナイト混合土、水密性のあるコンクリート製の蓋、コンクリートピット内面の腐食防止対策、廃棄物容器間の土壌による間詰めにより遮水し Cs の移動抑制することで担保される。遮断に対する安全性の確認は、汚染廃棄物が処分されるコンクリートピットの周辺に管理点検廊を設けることで行う。これらは、廃掃法に放射線防護の考え方を付加した放射性物質汚染対処特措法 (特措法) に準拠した構造である。

最終処分場の運営期間による区分を考えると、廃棄物を設置する操業期間中は、屋根を設置し、雨水から遮断する。その後、漏洩を監視する第一監視期間と、十分に放射能レベルが低下し、外部の地下水モニタリングなどで監視する第二監視機関に分類される。図-1 は第一監視期間に相当する。

以下はこの構造を補完、補強するための議論である。



図-1 汚染廃棄物の遮断型相当の最終処分場例¹⁾

*1 (独) 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター フェロー 工博 (正会員)

*2 (独) 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター センター長 工博 (非会員)

表-1 鉄筋コンクリート施設における飛灰の最終処分の課題(ゴシックは過酷事故 SA 時)

成分	生じる現象と課題	対策案
可溶性の放射性 Cs	水が作用し漏洩すると、地下水を汚染すると共に、環境の特定箇所に濃縮しホットスポットを形成する可能性が否定できない。	水の浸入防止、確実な遮断、不溶化
0.1-10ppm 程度の安定 Cs	原発事故由来の放射性 Cs の絶対量はごく微量だが、廃棄物中には桁違いに多量の安定 Cs があり、両者を扱う必要がある。	十分な吸着能がある材料*、不溶化
数%程度の KCl	ゼオライトやベントナイト、土壌には Cs 吸着特性があるが、水和イオン半径が近い K により吸着能力が極端に低下する。	共存イオン効果を考えた設計*
5-30%程度の CaCl ₂	遮水層の欠陥からの CaCl₂ の吸湿によるコンクリートの乾燥収縮。 CaCl₂ の吸湿・潮解により濃厚塩水発生。 SA により濃厚塩水がコンクリート層に達すると、塩害(鉄筋腐食)が発生。 同じく、濃厚な CaCl₂ 飽和溶液が膨張性水和物を生成し膨張破壊。	膨張材・収縮低減剤で軽減 100年はおきない計算 Cl 拡散係数の低減、エポキシ塗装鉄筋* ボゾラン物質の使用*
高濃度塩	同じく、濃厚塩化アルカリがコンクリートに接触すると、ASR 促進。	適切な抑制効果の検証*

*いづれも水の浸入防止が出来れば防ぎえる事象で、遮水がまずは考えられるべきである。その上で、SA 時に劣化を遅らせる対策案として提示した。

3. 飛灰の特性と想定される耐久性上の課題

処分対象の飛灰の特性について述べる。可燃性の一般廃棄物には塩素が含有され、燃焼により HCl が発生する。HCl 除去にバグフィルターで過剰の Ca(OH)₂ を吹き込み CaCl₂ として回収する。塩化アルカリも飛灰に移行する。アルカリとしては、Na と K が主体であるが、Cs も放射線と安定性の区別なく、飛灰に約 70% が濃集する。一般ごみの性質に依存するが、CaCl₂ は 5~30%、NaCl と KCl は各々 5% 前後、安定 Cs は 0.1~10ppm 程度である。

飛灰に CaCl₂ が含有されることから、浸水がなくとも大気からの吸湿・潮解現象により液相が発生する可能性がある。例えばシャーレに入れた飛灰を 50°C95%RH 環境に数日暴露すると塩水が発生する。現実的な条件を想定すると、フレキシブルコンテナ一杯に充填された状態から 100 年はコンテナから漏水しないと予想できる²⁾。

図-1 はすでに多重防護システムになっているが、あえて、コンクリート表面の腐食防止対策が破損する状況を考える(表-1)。CaCl₂ の平衡湿度は 32% であり、平衡溶液の Cl 濃度は 20% を超える。コンクリートピット内面は、強い乾燥条件に曝されながら、濃厚塩水に接することになる。コンクリートピットの厚さは 1 m 以上となる場合もあり、温度ひび割れに加え、乾燥ひび割れの発生とひび割れを通じた濃厚塩水の鉄筋への作用が懸念される。さらに、濃厚塩水はアルカリ骨材反応(ASR)と膨張性鉱物(3CaO・CaCl₂・15H₂O)の生成によるひび割れ発生と脆化にも繋がる可能性を持つ。



図-2 屋根を有する遮断型相当の最終処分場の例

4. 設計と管理の考え方: 多重防護と過酷事故時のマネジメント

原子力関連施設(発電所と放射性廃棄物処分場など)は、多重防護の考え方にに基づき設計・建設される。汚染飛灰の最終処分場も、地下水面以上での設置、土壌とベントナイト混合土による雨水の防止、水密性コンクリートと腐食防止対策による遮断という多重防護構造となっている。さらに安全性の確認を担保するため、管理点検廊を設け、人による監視と補修を可能としている。

ここで、前章で述べたようなコンクリート上の保護層の欠損と上部工からの漏水の発生を考える。図-1の構造ではコンクリートの内面に濃厚塩水が作用していることを検知できず、コンクリートの変状が検出されたときには相当程度に構造物が劣化しており、補修工事は容易ではないと予想できる。これを防止するには上部工からの漏水を確実に検知し、漏水時には補修ができる構造にすると良い。例えば屋根を設け、処分対象物に水が到達していないことを確認する(図-2)。また、フレキシブルコンテナを個別のコンクリート容器に収納しピットに並べ、周辺を監視できるように配置する方法も考える。

このように多重防護を施しても、結露を完全に防ぐことは難しい。水の浸入は予期できない経路から起きることも否定できない。そこでさらに何らかの原因でコンクリートピット内部に浸水する状況を考える。六ヶ所村では、底部にポーラスコンクリートが設置されており、浸水が検知できる構造となっている。ここでもピット下部の保護層のさらに下面にポーラスコンクリートを設置すれば、濃厚塩水の発生を検知できる。濃厚塩水が発生するとコンクリートの劣化が始まる。このような通常は起き得ない現象により第一監視期間中にコンクリートが著しい劣化を生じる事態を過酷事故(SA)と位置付ける。濃厚塩水発生時の検知時はコンクリートの劣化速度を考慮し、必要に応じて、被覆土壌、コンクリート蓋を除去し、保管廃棄物を取り出し、コンクリートピットを再構築す

表-2 遮断型相当の最終処分場の要求性能とマネジメント

		施設に要求される性能			マネジメント	
		構造(躯体)性能	放射線防護に対する性能			
			機能	許容被曝量		
平常時	操業段階	健全である	漏えいなし	1mSv/y	施工時ひび割れの補修、浸水防止	
	第一監視期間	有害なひび割れを許さない	閉じ込め	10μSv/y	常時モニタリング、定期点検	
	第二監視期間		閉じ込め	10μSv/y	周辺環境定期測定	
異常時 (豪雨、 暴風等)	操業段階	速やかに変状等を補修できること	漏えいなし	1mSv/y	浸水点検、排水	
	第一監視期間	閉じ込め	閉じ込め	10μSv/y	臨時点検、排水	
	第二監視期間		閉じ込め	10μSv/y	周辺環境定期測定	
異常時(地震)	レベル1	操業段階	健全である	漏えいなし	1mSv/y	臨時点検
		第一監視期間	有害なひび割れを許さない	漏えいなし	10μSv/y	常時モニタリング、定期点検
		第二監視期間		漏えいなし	10μSv/y	周辺環境定期測定
	レベル2	操業段階	速やかにひび割れ等を補修できること	閉じ込め	5mSv/回	臨時点検とひび割れの補修
		第一監視期間	閉じ込め	閉じ込め	5mSv/回	
		第二監視期間		閉じ込め	閉じ込め	10μSv/y
過酷事故時 操業段階、第一監視期間		急速な劣化の回避	閉じ込め	5mSv/回	1) コンクリートへの漏水検知 2) コンクリートの劣化検査/予測 3) 処分対象物の取り出しと補修	

*) 「閉じ込め」とは、外周仕切設備の内側に封じ込める性能を示す。

**) マネジメントとは、ここでは人が積極的に行動し行う維持管理業務、すなわち、点検、予測、補修、補強を指す。

る、というマネジメントにより SA に対応する。

この際、濃厚塩水発生の検知から、劣化の評価と予測、さらに対策までの時間、十分にコンクリートは耐久である必要がある。すなわち濃厚塩水に曝されても直ちに構造性能が問題となるような変形、鋼材腐食を起こさないこと、つまり余裕度の確保が求められる。また、劣化予測により第一監視期間の間、構造物の健全性が確認できるならば特別な対応は不要である。

5. 要求性能

汚染廃物の最終処分施設としての、遮蔽、遮断、安全性確認の機能を満たすため、施設に求められる性能を表-2 にまとめる。性能は構造性能と放射線防護に関する性能に区分し、さらにマネジメントによる対応を加えた。考慮する事象は、平常時、水に関する異常時、地震に関する異常時、過酷事故時に区分し、さらに操業段階、第一監視期間、第二監視期間に区分して記載した。

地震に対しては、レベル1では有害なひび割れがないように設計することを求め、レベル2では速やかに補修できることを求めた。

6. 耐久性と対策

SA 時に余裕度を確認するためには、まず、コンクリート構造物が平常時において健全である必要がある。この要件を設計事象と位置付ける。一方で、濃厚塩水漏洩時にも完全な遮断性をコンクリートに求めることは困難であるため、コンクリートの劣化を遅らせ、マネジメントによる対応が可能となるように余裕度を確保する事象を別に考えた。設計事象は温度応力ひび割れの制御、中性化と ASR の抑制である。余裕度を確保する事象は、乾燥ひび割れ、塩害、ASR (外来塩由来)、塩類劣化である。

表-3 コンクリートの配合表³⁾

名称	W/C (%)	s/a (%)	目標 空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	P			S	G
					C	FA	Ex		
普通	55.0	47.0	4.5	163	296	0	0	850	961
対策	40.0	44.0	4.5	157	393			751	979
					257	118	18		

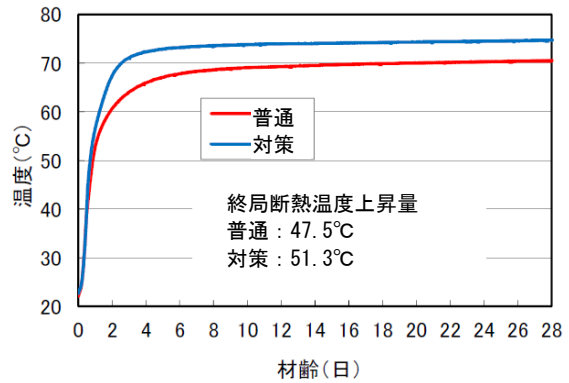


図-3 普通および対策コンクリートの断熱温度上昇

なお、地下構造物なので、凍結融解は考慮していないが、地上面近傍では空気量の確保も重要である。

これらへの対策として、ここではフライアッシュセメント C 種(セメントの 30mass%置換)と膨張材(JIS A6202 拘束膨張試験 A 法で膨張量 150~200μ)を利用した対策コンクリート(W/C=0.40)を考え(表-3³⁾)、普通コンクリート(W/C=0.55, 20°C水中 28 日養生)と比較した。対策コンクリートではフライアッシュの効果を十分に引き出すため、40°C水中 28 日養生後に試験を行った。

6.1 設計事象

(1) 温度応力ひびわれ

温度応力ひび割れを算定するため、断熱温度上昇(図-3)と自己収縮を測定し、その結果を元に図-1に示す外部側壁でのひび割れ発生を予測した(図-4)。評価は小柳らの手法⁴⁾を応用した1次元モデルである。対策

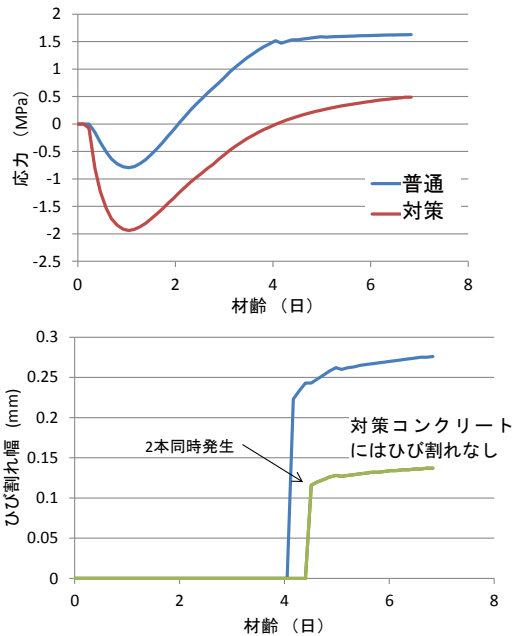


図-4 普通および対策コンクリートに発生する温度応力(上)とひび割れ(下)の予測

コンクリートの断熱温度上昇は普通コンクリートを上回ったが、膨張材の効果により硬化時に圧縮応力がコンクリートに導入され、冷却時に発生する収縮応力を低減できた。解析では普通コンクリートでは0.2mm程度のひび割れが複数発生したが、対策コンクリートではひび割れ発生しない。

(2) 中性化

フライアッシュを多量使用することで中性化促進が懸念されるが、水セメント比を40%と低くすることで十分な耐久性を確保する。操業期間中を除き、地下構造物であり、中性化速度は十分遅いと予想できる。

(3) ASR

現行のASR抑制対策は不十分である場合が指摘され、有効な期間も不明である。骨材のアルカリ反応性を評価する方法は提案されているが、コンクリート配合次第で結果が異なることも分かっており、限界がある。そこで、RILEM AAR-4を参考に、温度を60℃に上げ、アルカリ総量を5.5kg/m³に増やした加速コンクリートプリズム試験(CPT)を行い、コンクリート配合を評価した。ここでは、非反応性と考えられている石灰石骨材を用いるのではなく、建設地で入手可能な骨材を経済的観点から使用することを考慮し、混和材添加による抑制対策を施し、安全性を確認して使用することとした。

加速試験の結果を記述するには、Lariveの成果⁵⁾を参考に式(1)を用いた。

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_\infty (1 - \exp(-t/\tau_C))}{1 + \exp[-(t - \tau_L)/\tau_C]} \quad (1)$$

ここに、 ε_t : 時間 t における膨張量 (%), ε_∞ : 最終膨張量 (%), τ_C, τ_L : 時間を表す定数 (年)。

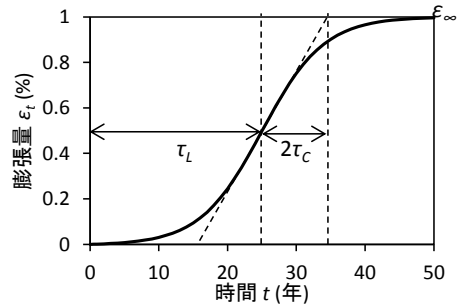


図-5 ASR膨張挙動のモデル化の概念図⁶⁾

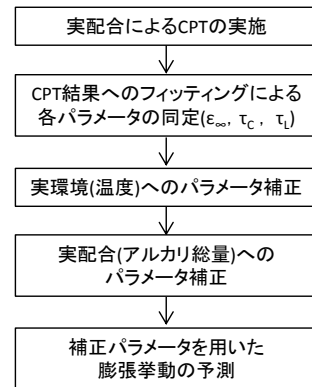


図-6 CPTを活用したASR膨張挙動予測フロー⁷⁾

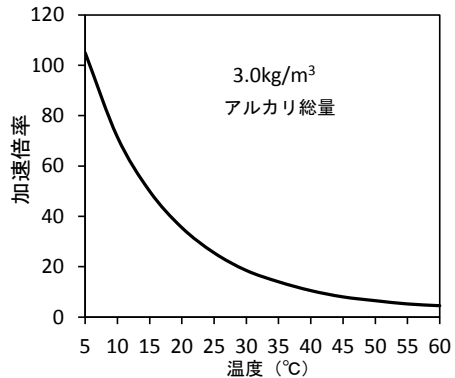


図-7 実環境温度に対するCPTの加速倍率⁷⁾

図-5に各パラメータの概念図を示す⁶⁾。CPTと実環境において異なる主な要因は、環境温度とコンクリートのアルカリ総量である。したがって、図-5に示した3つの定数 ($\varepsilon_\infty, \tau_C, \tau_L$) について、温度依存性およびアルカリ濃度依存性を考慮し定数を補正する(図-6)⁶⁾。

こうして求めたCPTの膨張の、実環境における実配合コンクリートに対する倍率(加速倍率)を図-7に示す。加速倍率は温度とアルカリ総量双方の影響を受けるため、双方の加速倍率を考慮する必要がある。加速倍率は、構造物の想定供用期間からCPTで実施すべき加速期間を定める際に有用と考える。例えば、温度15℃の湿潤環境において構造物が100年供用され、構造物にアルカリ総量3.0kg/m³のコンクリートが使用されると仮定した場合、図-7から加速倍率は50倍となる。したがって、CPTの加速期間は約2年必要になると試算できる。このように、加速倍率を用いることで、長期の供用が想定される構造物に適したCPTの加速期間の設定が可能となる。

6.2 余裕度の確保

(1) 乾燥ひび割れ

鉄筋コンクリートピットの水分移動、体積変化、およびひび割れの解析を行った。解析対象の要素分割イメージと各部屋の設定湿度を図-8に示す。ピットは左右対称なので片側一方を解析対象とした。埋立地床部のかぶり100mm部分に鉄筋比0.3%となるように鉄筋を入れた。

ここで示す解析は2次元の水分移動FEM解析と、水分移動解析によって推察される含水率から乾燥収縮ひずみを予測し、それを等価接点力として力の釣り合いを解く2次元応力FEM解析を連成したものである。フライアッシュで30%置換した普通コンクリート(FAコンクリート)も追加し、含水率と収縮ひずみの関係は別途実験により求めた(図-9)。

評価の材齢は竣工後10年を想定した。スミアードモデルにおいて引張ひずみが卓越した積分点を図示したものを図-10に示す。対策コンクリートは、初期膨張により収縮ひび割れが大幅に減少する。実際は、圧縮応力がクリープで抜け、自己収縮が緩やかであるが内部で進行する影響なども生じるので、より危険側になる評価が考えられるが、これらを相殺したものと同等のFAコンクリートの解析でも同等のひび割れであり、対策コンクリートはひび割れ抑制効果が高いと考えられる。

(2) 塩害

汚染飛灰の最終処分場で起きる塩害は、SA時に限定される。発生する液相の塩濃度を求めるため、非汚染の焼却飛灰サンプル(流動床炉)を入手し、飛灰ペーストを作製、流動性が得られる最低の固液比0.25で液相をサンプリングした。主要イオン濃度を表-4に示す。

この濃度の溶液を純薬合成し、分析可能なレベルとするために最低でも現実よりも10倍程度濃厚ではあるが、安定CsClを400ppmとなるように添加した。普通コンクリートと対策コンクリートを浸漬し、表面から機械研削により粉末サンプルを得て、全量を酸/アルカリ溶解し、イオン濃度を分析した。

CsとClの浸透プロファイルを図-11に示す。普通コンクリートに比べ、対策コンクリートは浸透深さが約半分に減少している。両者は養生条件が異なり、その影響を今後、考慮した解析が必要である。ここで重要なのは、両者の比較ではなく、CsとClの濃度プロファイルである。CsはClと同等か、やや小さい浸透深さである。したがって、鉄筋コンクリートの発錆が、Cs漏洩の指標となりえる。ただし、塩害については、微小ひび割れの発生を否定できず、濃厚塩水による鉄筋腐食速度も不明であるので、本施設にはエポキシ塗装鉄筋など耐塩性がある鋼材を利用するのがよく、SA時にはCl浸透深さを測定することで低濃度のCs浸透位置も推定できる。

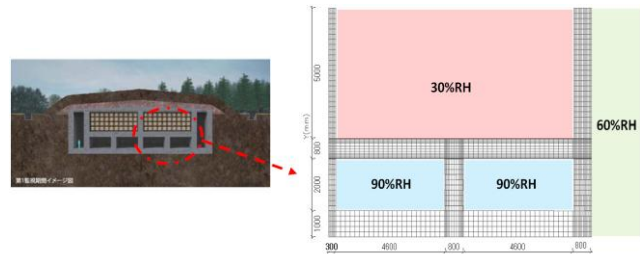


図-8 解析対象要素分割図

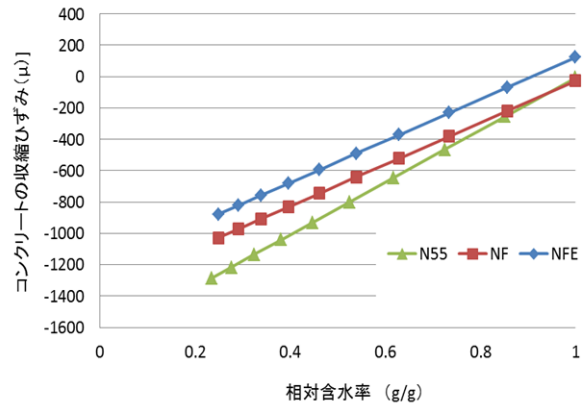


図-9 相対含水率とコンクリートの収縮ひずみの関係
N55：普通、NF：FA、NFE：対策の各種コンクリート

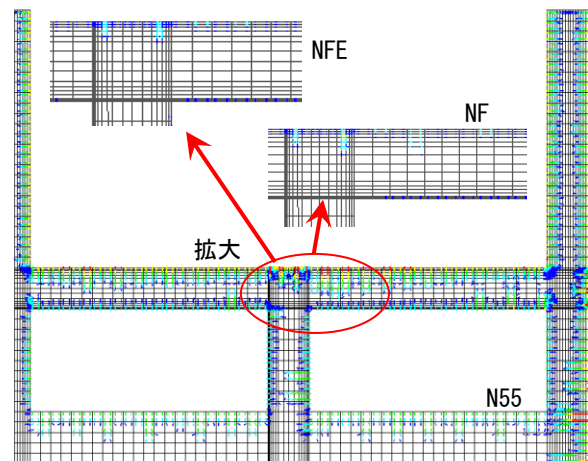


図-10 ひび割れ解析の結果(凡例：図-9と同じ)

表-4 固液比0.25の飛灰ペーストの液相組成

濃度 (M)				pH
Na	K	Ca	Cl	
2.55	1.32	1.38	6.61	11.05

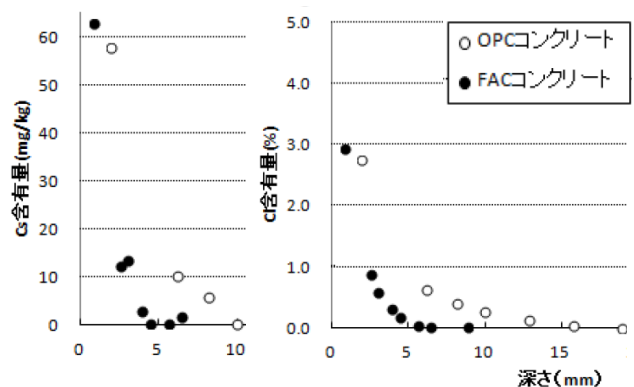


図-11 CsClの浸透プロファイル

(3) ASR

表-4 に示した溶液に、反応性が極めて高いオパールを含有する安山岩がペシマム条件で粗骨材に含有させた CPT (アルカリは無添加) を浸漬し、膨張挙動を 6.1(3) と同じ条件で調べた。図-12 に示すように、材齢 28 日において 0.20 の膨張率を示し、濃厚塩水により ASR が加速された。純水に浸漬しただけでは膨張しない。このコンクリートにフライアッシュを 30% 添加することで、ASR 膨張は抑制できる。

(4) 塩類劣化

上記の ASR 膨張以外に、 CaCl_2 の濃厚塩は図-13 下⁸⁾ に示すように、コンクリートを膨張破壊する。この現象は低温で顕著であるため、前記(3)の FA を含まないコンクリートを 20℃ と 40℃ の表-4 の溶液に浸漬した。3 ヶ月経過後まで変状は認められないが、X 線回折分析によると $3\text{CaO}\cdot\text{CaCl}_2\cdot 15\text{H}_2\text{O}$ の生成が確認された。Na が抑制効果を示している可能性がある。FA の効果も加え、より長期の評価が必要である。

8. まとめ

汚染飛灰の最終処分という困難な課題に対して、最新のコンクリート材料に関する技術を駆使し、同時に耐久性を設計段階から積極的に考慮し、100 年オーダーでの構造物の確実な機能保持が可能となる考え方を示した。

構造設計と材料設計だけで完全を期するのではなく、通常の点検、維持管理に加え、さらに厳しい過酷事故を想定したマネジメントの手順を明らかにし、現在の多くの最新技術を活用し、より安全性を高めた。

汚染飛灰の最終処分では考えうるほとんどの耐久性上の課題を考慮する必要があった。これらへの対策は過酷事故時において余裕度を確保できる点と、さらに今後、議論が必要であるが、従来の放射性廃棄物では砂相当とみなされていたコンクリートが、第二監視期間へ移行後の長期にわたる遮断性能にも有効と期待できる。

本研究が、環境省の放射能汚染した廃棄物の処分事業に役立つことを期待する。

謝辞：本研究は、国立環境研究所が主催する「汚染廃棄物等最終処分場へのセメント・コンクリート技術適用に関する研究会」の成果をまとめたものである。長瀧重義 東京工業大学名誉教授、斉藤成彦 山梨大学准教授、丸山一平 名古屋大学准教授、半井健一郎 広島大学准教授、(独) 港湾技術研究所 川端雄一郎 博士、(財) 電力中央研究所 蔵重勲 博士、(独) 国立環境研究所 山田正人 室長、遠藤和人 主任研究員、さらに多数の方の協力をいただいた。特に温度応力ひび割れと乾燥ひび割れの解析は丸山一平准教授によるものである。ここに記して謝意を表する。

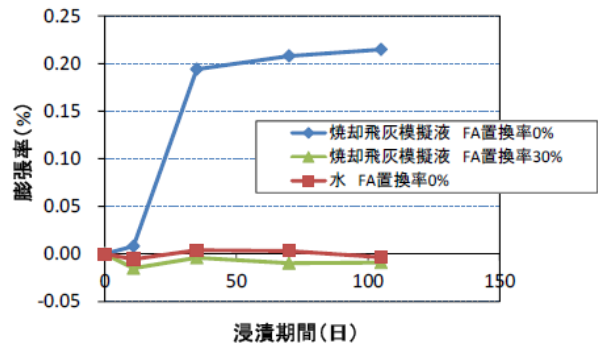


図-12 濃厚塩水の中での ASR 加速

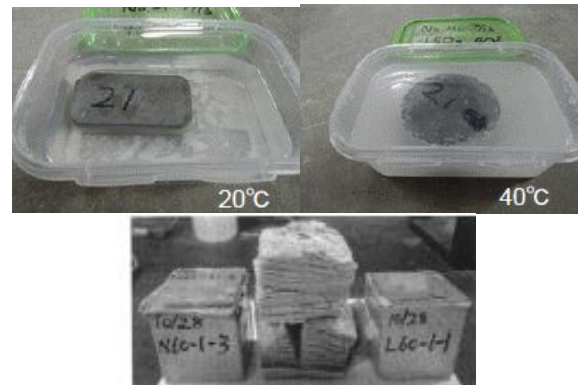


図-13 濃厚塩水への浸結果(上)と既報の濃厚 CaCl_2 溶液中での膨張挙動(下)⁸⁾

参考文献

- 1) 環境省指定廃棄物処理情報サイト
<http://shiteihaiki.env.go.jp/01/01.html>
- 2) 市川恒樹, 山田一夫, 大迫政浩: 潮解性塩類の吸湿による焼却飛灰からの放射性セシウム溶出時期の予測, 廃棄物資源循環学会第 24 回研究発表会, pp.571-572
- 3) 谷村充博士より提供
- 4) 小柳 光生, 増田 安彦, 中根 淳: 乾燥収縮による外壁のひび割れ幅予測に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.2, No.2, pp.59-68, 1991
- 5) Larive, C.: Apports Combinés de l'Experimentation et de la Modelisation à la Compréhension de l'Alcali Reaction et de ses Effects Mecaniques, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1998 (in French)
- 6) 川端雄一郎, 山田一夫, 小川彰一, 大迫政浩: 加速コンクリートプリズム試験を用いたコンクリートの ASR 膨張予測に関する試み, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.13, pp.453-458
- 7) 川端雄一郎, 山田一夫, 小川彰一, 佐川康貴: 加速コンクリートプリズム試験を用いた ASR 膨張の簡易予測, セメント・コンクリート論文集 (印刷中)
- 8) 森寛晃, 久我龍一郎, 小川彰一, 久保善司: 塩化カルシウム溶液による各種セメント硬化体の劣化, セメント・コンクリート論文集, 2012